

УДК 532.529.5:536.24

Корреляционный алгоритм расчета полей скорости в микроканальных течениях с высокой разрешающей способностью*

М.Н. Карчевский^{1,2}, М.П. Токарев¹, А.А. Ягодницына^{1,2},
Л.А. Козинкин^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mails: karchevskymi@gmail.com, mtokarev@itp.nsc.ru,
yagodnitsinaaa@gmail.com, leon7archer@gmail.com

В работе реализован кросскорреляционный алгоритм, который позволяет получать поле скорости в потоке с пространственным разрешением до одного пикселя на вектор, что дает новую информацию о структуре микропотоков, а также значительно повышает точность измерения поля скорости потока. Помимо этого, реализованный алгоритм предоставляет информацию о пульсациях скорости в структуре потока. Тестирование алгоритма проводилось на синтетических данных при различном количестве тестовых изображений, распределение скорости на которых было задано звездой Сименса. Экспериментальная апробация выполнялась на данных, предоставленных в рамках международного проекта 4th International PIV Challenge. Кроме того, было выполнено детальное сравнение с алгоритмом Particle Image Velocimetry, реализованным ранее.

Ключевые слова: Particle Image Velocimetry, Single Pixel Resolution, micro-PIV, поле скорости, пульсации скорости, микроканал.

Введение

В настоящее время в технических отраслях растет потребность в эффективных и ресурсосберегающих процессах. В связи с этим разработка микроустройств стала быстро развивающейся областью исследования для интенсификации различных процессов в химии, биологии и т.д. Разработка современных микроустройств, таких как микрореакторы и микрофильтры, а также анализ массопереноса и гидродинамики течений на микроуровне требует измерения полей скорости с высоким пространственным разрешением. Одним из наиболее распространенных и эффективных методов изучения гидродинамики в микропотоках является метод анемометрии трассирующих частиц с микронным разрешением (micro-PIV — Micro Resolution Particle Image Velocimetry). Метод был разработан в 1999 году [1] на основе PIV-метода, ставшего уже стандартным для изучения полей скорости в жидкостях и газах. Наследуя основные преимущества метода PIV, такие как бесконтактность и широкий динамический диапазон измерений, micro-PIV позволяет измерять векторные поля скорости в микроканалах с микронным разрешением.

* Работа выполнена при финансировании РНФ (грант No. 14-19-01685, под руководством Д.М. Марковича).

Как и стандартный метод PIV, метод micro-PIV для расчета полей скорости использует разбиение трассерных картин на расчетные области. Таким образом, пространственное разрешение метода ограничено размером ячейки разбиения, и при высоких скоростях потока и больших градиентах скорости стандартный алгоритм расчета дает неудовлетворительные результаты.

Впервые алгоритм обработки трассерных изображений с пространственным разрешением до одного вектора на пиксель (Single Pixel Resolution) был представлен в работе [2]. Авторы работы [3] предложили использовать симметричную двойную корреляцию для улучшения сходимости этого алгоритма за счет уменьшения влияния обрезания яркости частицы по границе расчетной области малого размера. В настоящей работе представлены результаты разработки другой модификации оригинального алгоритма расчета средних полей скорости и пульсаций скорости, одной из ее особенностей является возможность анализа формы корреляционных пиков. Метод позволяет работать при меньшем количестве пар используемых изображений для расчета осредненных корреляционных плоскостей за счет интенсификации вычислений и использования информации из близлежащих соседних областей.

1. Описание используемого метода

Классические двухкадровые алгоритмы расчета поля скорости применимы для исследования движения жидкости в микроканалах, но при этом дают значительную погрешность. Плотность засева потока в микроканальных устройствах, как правило, невысока, что приводит либо к недостаточному количеству частиц в расчетной ячейке для выделения максимума корреляционной функции, либо к увеличению размера расчетной ячейки, а значит, к низкому пространственному разрешению метода. Так как в микроканалах преобладает ламинарный (стационарный) режим течения, то возможно использование средних характеристик потока для анализа поля течения. Ниже представлены результаты разработанного метода, позволяющего проводить корреляцию изображений одного эксперимента по ансамблю с пространственным разрешением в один пиксель, использующего подход к расчету средних полей скорости в микроканалах, описанный в работе [4].

Вычислительную сложность прямого расчета корреляционных функции для одной пары изображений при размере шаблона в один пиксель можно оценить в $O(W \cdot H \cdot w \cdot h)$ операций, где W, H — ширина и высота изображения, w, h — ширина и высота корреляционной функции соответственно. Также произведение $W \cdot H \cdot w \cdot h$ соответствует числу переменных, которые необходимо хранить в памяти для накопления статистики по набору пар изображений частиц, эту информацию необходимо учитывать при реализации алгоритма, так как нехватка оперативной памяти может привести к резкому замедлению выполнения программы. Корреляционная функция в точке (i, j) изображения считается по формуле

$$R_{\Delta r, \Delta s}(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N (I_1^n(i, j) - \bar{I}_1(i, j)) \cdot (I_2^n(i + \Delta r, j + \Delta s) - \bar{I}_2(i + \Delta r, j + \Delta s))}{\sigma_1(i, j) \cdot \sigma_2(i + \Delta r, j + \Delta s)}, \quad (1)$$

$$\bar{I}_k(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_k^n(i, j), \quad \sigma_k(i, j) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (I_k^n(i, j) - \bar{I}_k(i, j))^2},$$

здесь $(\Delta r, \Delta s)$ являются координатами корреляционной плоскости и меняются в промежутке $(-w/2, w/2)$ по x и $(-h/2, h/2)$ по y соответственно, а I выступает функцией распределения интенсивности на изображениях (см. рис. 1).

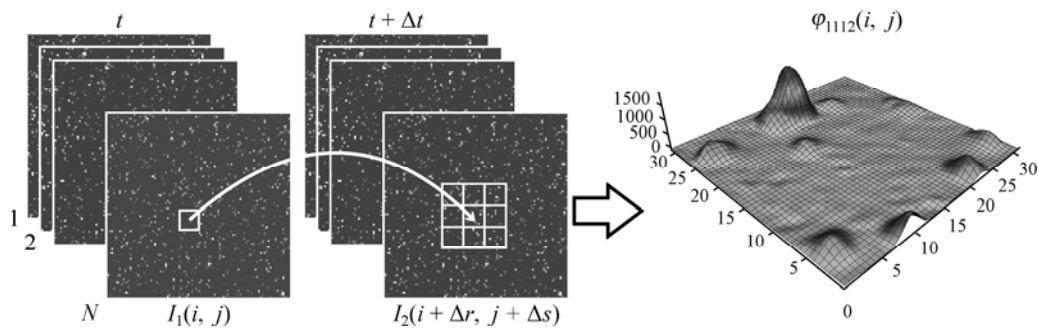


Рис. 1. Принципиальная схема расчета поля скорости методом Single Pixel Resolution.

После выполнения шага алгоритма, на котором происходит расчет корреляционных функций, осуществляется поиск положения максимума на корреляционной плоскости с точностью до пикселя. Для получения субпиксельной точности положения корреляционного пика использовались различные алгоритмы аппроксимации функцией Гаусса. Итерационный алгоритм нелинейной минимизации, обеспечивающий необходимую точность восстановления параметров функции Гаусса, является достаточно ресурсоемким алгоритмом. Принцип его работы заключается в подгонке параметров функции Гаусса путем минимизации невязки между аналитически заданной функцией и пиком, полученным в ходе вычислений (минимизация производилась методом Левенберга–Марквардта).

Усредненная корреляционная функция содержит в себе информацию не только о наиболее вероятной скорости потока, но и о величине пульсаций потока в данной точке пространства. Эта дополнительная информация может быть получена из формы корреляционного пика. Теоретический идеальный корреляционный пик должен представлять собой двумерную функцию Гаусса. Для полного описания формы корреляционного пика необходимо знать положение центра пика, дисперсию относительно осей x и y , а также поворот функции пика относительно осей. Из дисперсий функции Гаусса, аппроксимирующей кросскорреляционный пик по осям x и y , можно оценить квадрат пульсаций скорости по этим координатам [4].

Корреляционная функция, полученная в результате работы алгоритма, также содержит статистическую информацию о трассерных частицах. Таким образом, после работы алгоритма мы получаем не истинную корреляционную функцию R_0 , а ее свертку с автокорреляционной функцией изображения трассерной частицы R_p [5]:

$$R(x, y) = R_0(x, y) \cdot R_p(x, y). \quad (2)$$

В случае, когда корреляционная функция достаточно точно аппроксимируется функцией Гаусса, истинное значение квадрата пульсаций можно получить путем вычитания дисперсий, полученных из автокорреляционной функции.

Таким образом, анализируя помимо максимума корреляционного пика еще и его форму, можно получить более детальную информацию о структуре течения.

2. Результаты

2.1 Тестирование на синтетических данных

В этой части работы описывается тестирование разработанного алгоритма на синтетических данных, демонстрируются возможности указанного алгоритма на примере неоднородного распределения скорости в потоке. В общей сложности было сгенерировано 10000 пар PIV-изображений с размером кадра 256×256 пикселей. Изображения представляли собой смещения частиц с распределением скорости по x -компоненте в виде звезды Сименса.

Скорость оставалась постоянной в каждой точке изображения на каждой паре кадров. Размер частицы составлял три пикселя в диаметре. Изображения частицы моделировались распределениями интенсивности по функции Гаусса со средним значением в нуле и дисперсией 1,5. Плотность частиц на изображениях была относительно низкая и составляла 0,00035 частиц на пиксель.

Флуктуации скорости были полностью не коррелированы, это означает, что даже изображения частиц, находящиеся рядом в кадре, могут двигаться в разных направлениях. Такое движение представляет собой слабый турбулентный поток. Смещение по x -компоненте моделировалось по следующему закону:

$$dx = 0,5 + 3 \exp \left[-8 \left(\frac{x - w/2}{(y - h/2) \cdot 1,25} \right)^2 \right] + \exp \left[-8 \left(\frac{y - w/3}{(x - h/2) \cdot 0,75} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Тестирование проходило при различном количестве проекций с моделированным движением частиц. На рис. 2 видно, как менялось качество восстановленного поля с увеличением числа пар изображений. При 10000 проекциях получаемое поле смещений практически полностью идентично моделированному. В свою очередь, ста проекций явно недостаточно для получения достоверной информации о потоке. Средняя ошибка скорости вычислялась по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{\sqrt{(v_x - v'_x)^2 + (v_y - v'_y)^2}}{w \cdot h}, \quad (4)$$

где v_x, v_y — компоненты поля скорости, полученные в результате работы алгоритма, v'_x, v'_y — истинные компоненты скорости, рассчитанные при помощи формулы (3), w, h — количество значений по ширине и высоте поля скорости соответственно. На рис. 3 показана средняя ошибка скорости в зависимости от количества кадров.

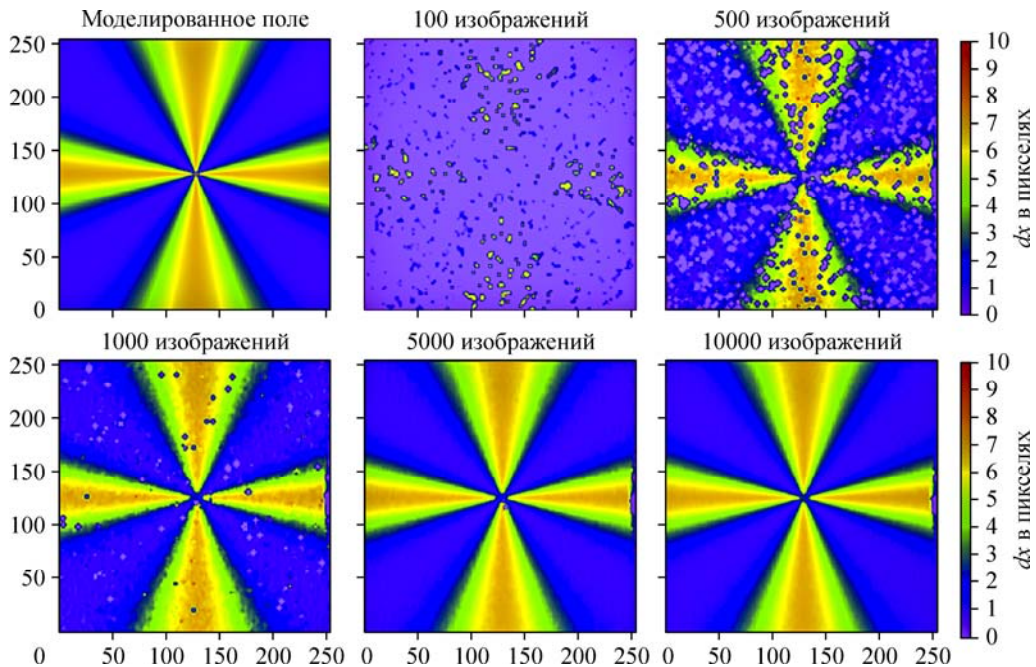


Рис. 2. Моделированное поле скорости и восстановленные поля при помощи алгоритма Single Pixel Resolution при различном числе изображений.

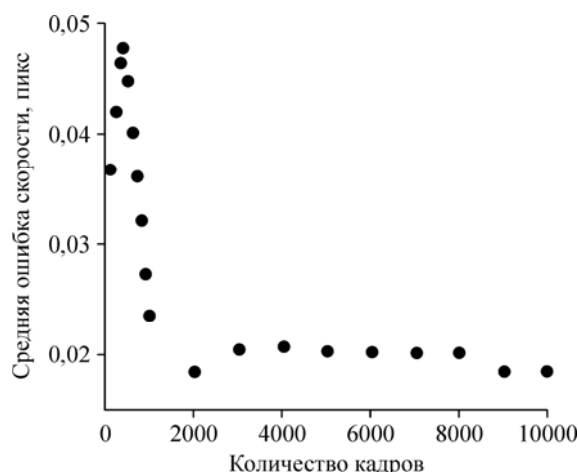


Рис. 3. Средняя ошибка скорости в зависимости от количества кадров.

На графике видно, что 2000 кадров при заданной плотности достаточно для корректной работы алгоритма. На рис. 4 построен профиль скорости вдоль x компоненты при $y = 50$ для разного количества изображений. Расчеты производились на 6-ядерном процессоре Intel(R) Core(TM) i7-3970X с тактовой частотой 3,5 ГГц. Зависимость времени работы алгоритма от количества кадров носит линейный характер.

2.2 Обработка экспериментальных данных

Реализованный алгоритм был применен для обработки экспериментальных данных, предоставленных в рамках международного проекта 4th International PIV Challenge. Было обработано 600 пар изображений трассерных картин, предоставленных для обработки группой из университета Мюнхена. Измерения проводились в устройстве, представляющем собой прямой микроканал с резким уменьшением поперечного сечения и

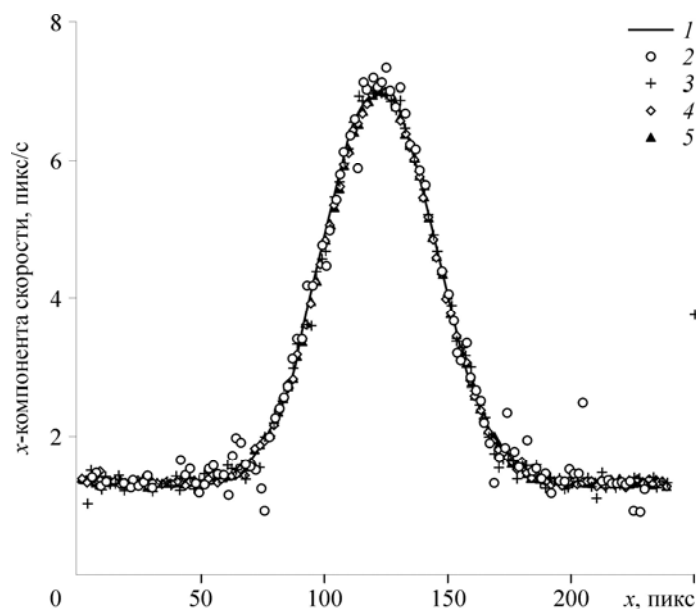


Рис. 4. Профиль скорости вдоль x -компоненты при $y = 50$.

1 — модельные значения; количество кадров: 500 (2), 1000 (3), 5000 (4), 10000 (5).

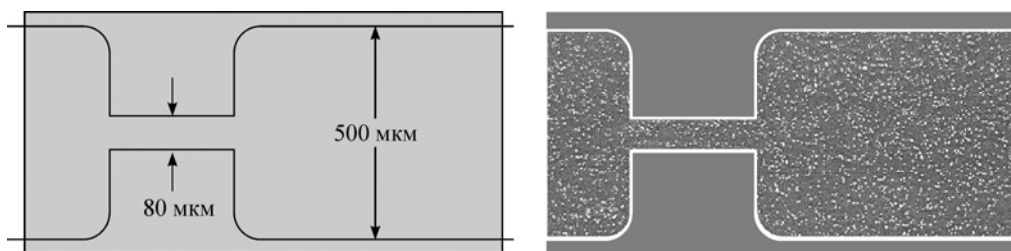


Рис. 5. Схема экспериментального объекта.

последующим внезапным расширением (см. рис. 5). Поток засеивался флуоресцентными частицами полистирола средним диаметром 1 мкм. Изображения частиц были получены с помощью микроскопа Zeiss Axio Observer с двадцатикратным увеличением. Для съемки изображений потока использовалась камера sCMOS с временной задержкой 120 нс и матрицей 2560×1230 пикселей. Частицы освещались с помощью сдвоенного Nd:YAG-лазера с длительностью импульса 4 нс. Перепад давления в устройстве составил 200 бар. Благодаря резким перепадам ширины (от 500 до 80 мкм) скорость в микроканале менялась значительно и достигала значения 230 м/сек в области измерения. Гидродинамические эффекты включали кавитацию, взаимодействие частиц со стенкой, взаимодействие частиц друг с другом и сильные градиенты. Помимо сильных градиентов и широкого динамического диапазона скоростей, основные технические проблемы были вызваны глубиной корреляции, оптическими aberrациями, возникающими из-за достаточно большой толщины используемого стекла для защиты от высокого давления и низким соотношением сигнал/шум.

На первом этапе была проведена предварительная фильтрация экспериментальных изображений для устранения проблемы фонового шума, причинами которого могут служить неравномерная засветка лазерным ножом рабочего объема, различные отражения, блики или плохое качество органического стекла, из которого сделаны стенки рабочей области микроканала. На этапе предварительной обработки вычиталось минимальное среднее значение интенсивности, чтобы уменьшить фоновый шум. Затем применялся медианный фильтр для того чтобы избавиться от ярких одиночных пикселей. Далее вычиталось среднее значение интенсивности в ячейке размером 7×7 пикселей для того, чтобы уменьшить влияние размытых частиц за пределами глубины резкости объектива и больших кластеров частиц, появляющихся на изображениях. На последнем шаге пре-процессинга изображений использовался фильтр Гаусса с размером окна 5×5 пикселей для сглаживания изображений после применения предыдущих высокочастотных фильтров. При расчете среднего поля скорости шаг между узлами сетки составил 2×2 пикселя, при этом выполнялось перемножение пяти соседних корреляционных функций для подавления случайного шума.

После пробного запуска реализованного алгоритма на изображениях, полученных экспериментальным путем, было выявлено, что на корреляционной функции присутствует значительное количество шумовых пиков. Высокий уровень шума в данных возникает в результате существования погрешности оборудования и случайной погрешности, а также из-за малого размера окна корреляции, приводящего к низкому соотношению сигнал/шум (рис. 6, центральная корреляционная плоскость $R(x, y)$). Для борьбы с обнаруженным эффектом применялся метод уменьшения некоррелируемого шума на корреляционной плоскости, описанный в работе [6]. В центральной области корреляционной функции $R(x, y)$ в точке (x, y) располагаются шумовые пики. Соседние корреляционные

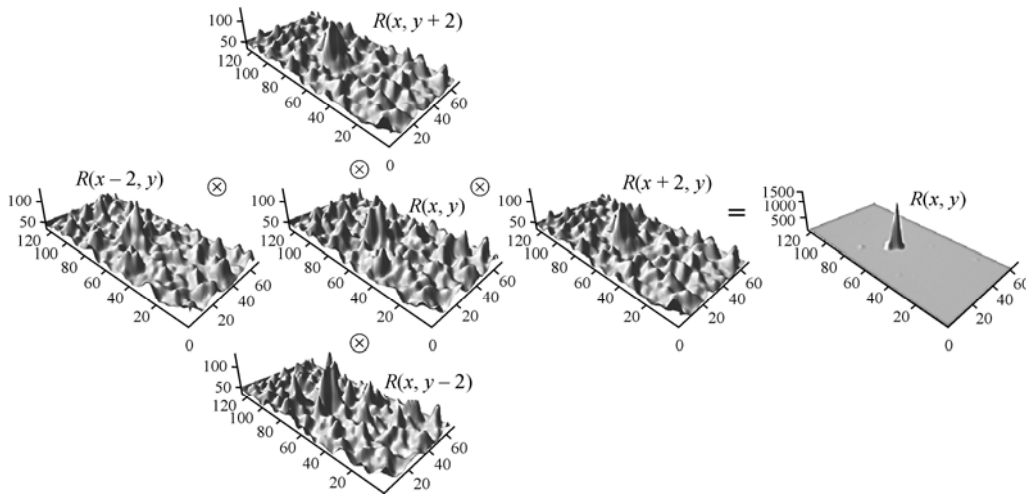


Рис. 6. Принципиальная схема работы алгоритма подавления шума на корреляционной плоскости.

функции, смещенные от центральной на два пикселя по четырем направлениям, имеют схожую структуру. Для получения конечной корреляционной функции пять соседних корреляционных плоскостей перемножаются между собой, а затем берется корень пятой степени:

$$R(x, y) = \sqrt[5]{R(x, y) \cdot R(x+2, y) \cdot R(x-2, y) \cdot R(x, y+2) \cdot R(x, y-2)}. \quad (5)$$

Так как шум некоррелирован, шумовые пики в значительной степени подавляются, и остается центральный истинный пик, необходимый для вычисления параметров потока. Рассмотренная процедура может быть применена с учетом того факта, что на указанном расстоянии смещение частиц в потоке изменяется незначительно. Но полученная корреляционная функция имеет меньшую разрешающую способность по сравнению с исходной, так как было выполнено усреднение по пространственным координатам.

На рис. 7–10 приведены результаты работы алгоритма, включающие в себя скалярное поле скорости, x и y компоненты скорости, а также x и y компоненты пульсаций скорости. Как и в предыдущем случае, была выполнена обработка тех же экспериментальных данных итерационным PIV-алгоритмом с расчетом корреляционной функции через

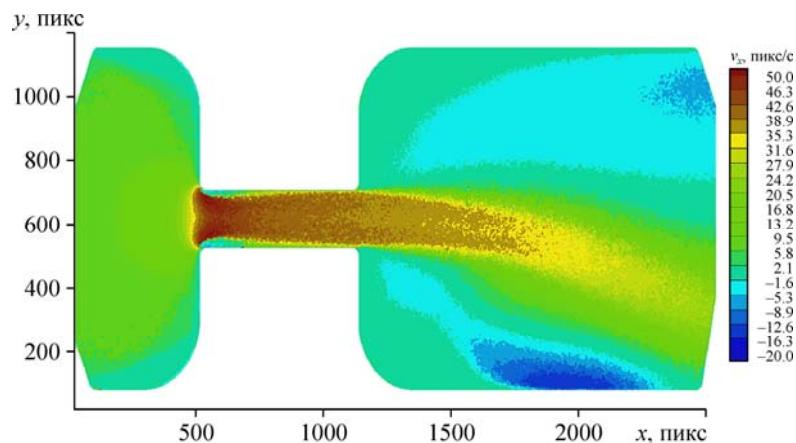


Рис. 7. Восстановленное алгоритмом Single Pixel Resolution скалярное поле V_x -компоненты скорости.

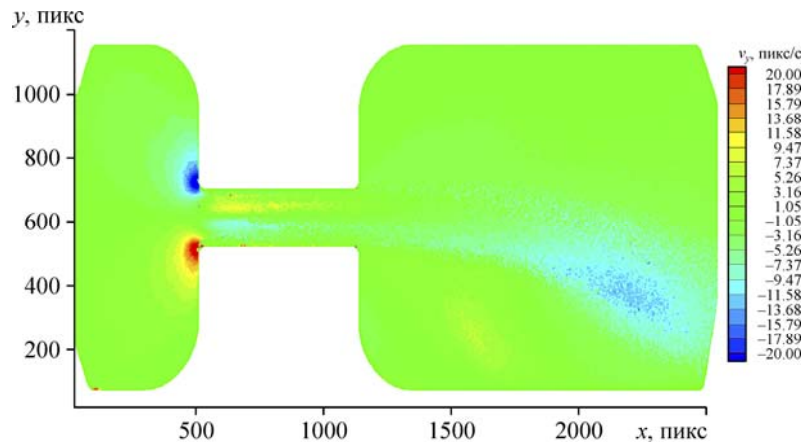


Рис. 8. Восстановленное алгоритмом Single Pixel Resolution скалярное поле V_y -компоненты скорости.

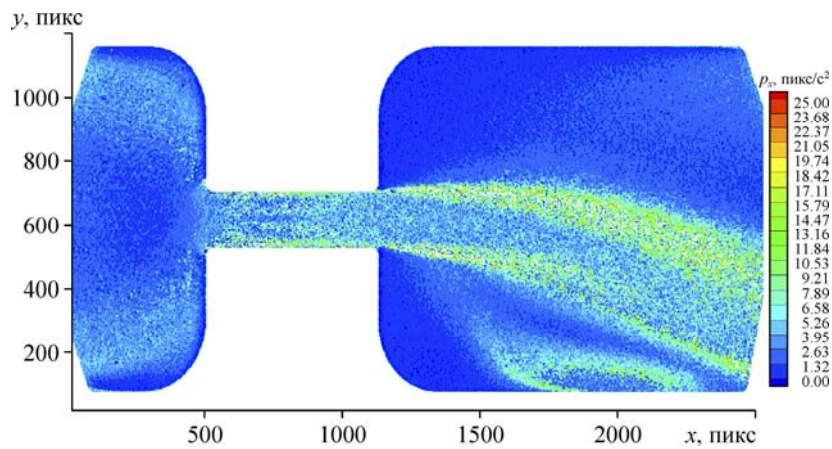


Рис. 9. Восстановленное алгоритмом Single Pixel Resolution скалярное поле пульсаций x -компоненты скорости.

быстрое преобразование Фурье с конечным размером окна в 32×32 пикселя. Эти результаты представлены на рис. 11–14.

Как видно из представленных изображений, метод Single Pixel Resolution позволяет получить более детальные поля скорости по сравнению с классическим алгоритмом PIV.

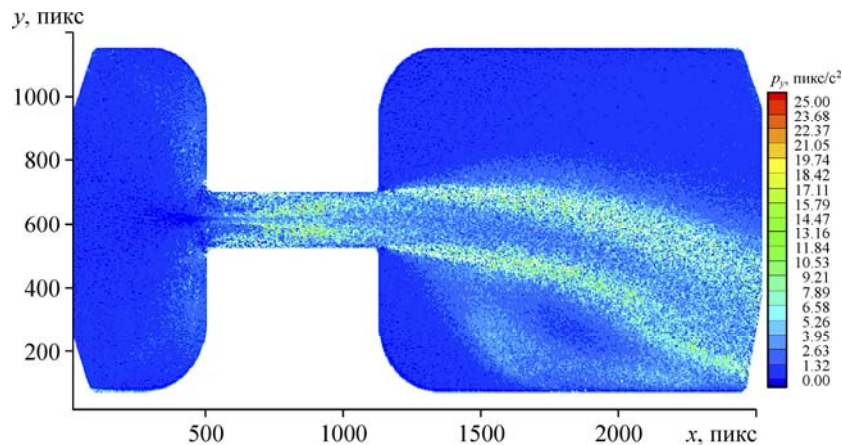


Рис. 10. Восстановленное алгоритмом Single Pixel Resolution скалярное поле y -компоненты скорости.

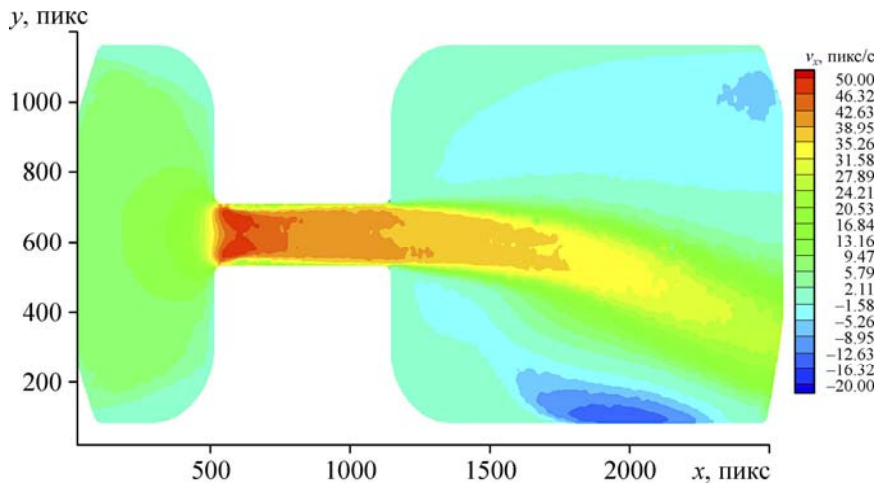


Рис. 11. Восстановленное алгоритмом PIV скалярное поле V_x -компоненты скорости.

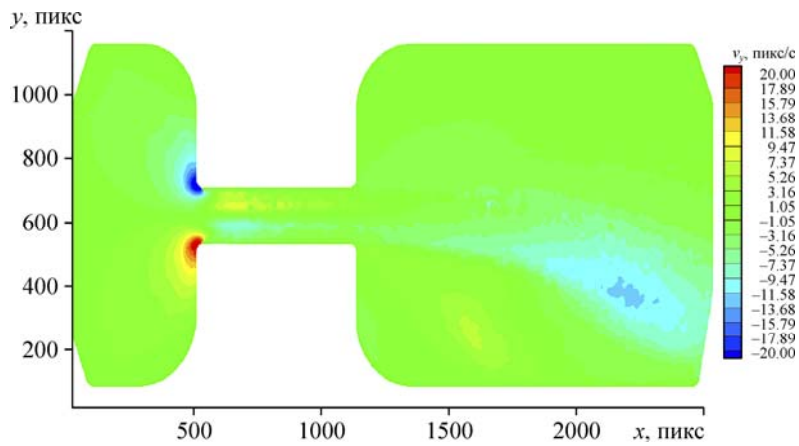


Рис. 12. Восстановленное алгоритмом PIV скалярное поле V_y -компоненты скорости.

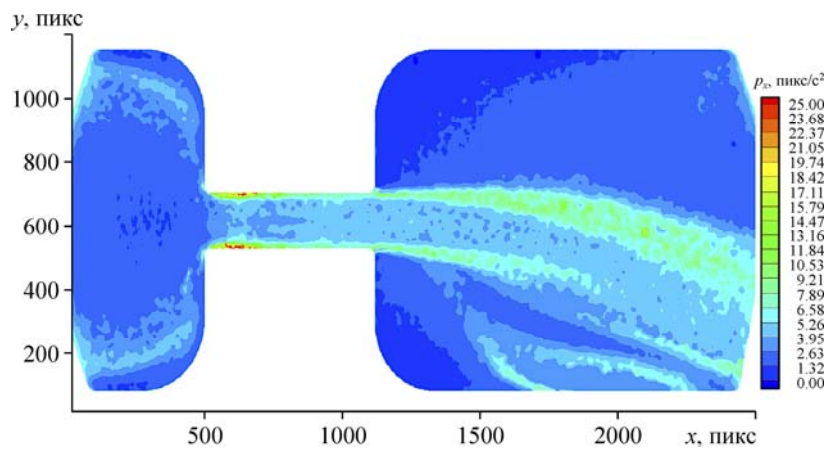


Рис. 13. Восстановленное алгоритмом PIV скалярное поле пульсаций x -компоненты скорости.

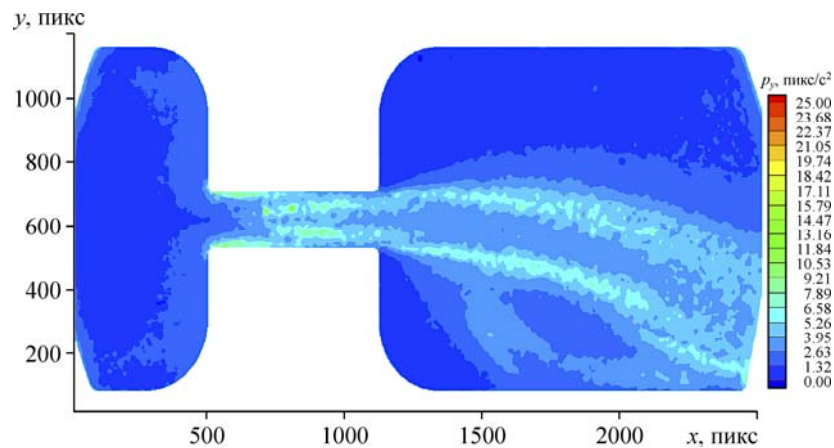


Рис. 14. Восстановленное алгоритмом PIV скалярное поле пульсаций y -компоненты скорости.

Следует отметить, что метод особенно эффективно показал себя при вычислении полей пульсаций: в отличие от результатов, полученных методом PIV, структура потока в сужении микроканала просматривается лучше.

Заключение

На основе известного подхода реализован модифицированный алгоритм Single Pixel Resolution для измерения полей скорости в микроканалах, который был протестирован на синтетических данных. Тесты показали, что для корректной работы алгоритма необходимо по крайней мере 2000 изображений с концентрацией 0,00035 частиц на пиксель для абсолютной погрешности порядка 0,02 пикселя. Предложенный метод позволяет получать информацию о величине средней скорости и турбулентных пульсациях скорости с пространственным разрешением в 1 пиксель.

Выполнена обработка гидродинамического PIV-эксперимента реализованным в рамках настоящей работы программным алгоритмом Single Pixel Resolution. Результат его работы сравним с результатом работы более ранних алгоритмов [7], а в некоторых случаях превосходит их, так как разработанный метод имеет большую разрешающую способность.

Список литературы

1. Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G. A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields // J. of Fluids Engng. 1999. P. 285–289.
2. Kähler C.J., Scholz U., Ortmanns J. Wall-shear-stress and near-wall turbulence measurements up to single pixel resolution by means of long-distance micro-PIV // Exp. Fluids. 2006. Vol. 41. P. 327–341.
3. Avallone F., Discetti S., Astarita T., Cardone G. Convergence enhancement of single — pixel PIV with symmetric double correlation // Exp Fluids. 2015. Vol. 56, No. 4. P. 1–11.
4. Scharnowski S., Hain R., Kähler C.J. Reynolds stress estimation up to single-pixel resolution using PIV-measurements // Exp Fluids. 2012. Vol. 52, No. 985–1002.
5. Rapp C., Manhart M. Flow over periodic hills: an experimental study // Exp. Fluids. 2011 Vol. 51, No. 1. P. 247–269.
6. Hart D.P. PIV error correction // Exp. Fluids. 2000. Vol. 29. P. 13–22.
7. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. P. 109–131.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2015 г.,
после доработки — 8 июня 2015 г.